

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学 号: 25320061152712

UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

钢筋混凝土主梁-次梁-板结构协同工作机理
及设计方法研究 I

—双向等柱距柱网、楼板等跨

Researches on Cooperative Work Mechanism and Design
Method of Reinforced Concrete Main-beam-Sub-beam-Slab
Structure

—Two-Way Column with Same Span, Slab with Same Span

吴 飏

指导教师姓名: 李少泉 教授

专 业 名 称: 结 构 工 程

论文提交日期: 2009 年 05 月

论文答辩时间: 2009 年 06 月

学位授予日期: 2009 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2009 年 05 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘 要

按照“边支承板”的观念设计钢筋混凝土主梁-次梁-板结构,无法体现主梁-次梁-板之间的协同工作特点,导致结构分析内力的分布(特别是楼板内力)与结构实际内力分布有较大差异。因此,揭示“边支承板”设计理论存在的问题,研究钢筋混凝土主梁-次梁-板结构协同工作机理,完善其内力分析方法,是工程界较为关心的问题之一。

本研究采用大型有限元软件 ANSYS 提供的 SOLID65 单元和 LINK8 单元,探讨并建立了符合钢筋混凝土梁板结构特点的非线性有限元模型,并通过与文献^[1]模型试验数据的对比分析表明,选择合适的计算分析参数,ANSYS 可以较为真实的模拟钢筋混凝土梁板结构的受力性能。

计算分析模型为一层双向等柱距 3 跨×3 跨钢筋混凝土主梁-次梁-板结构(足尺模型),按“边支承板”弹性理论设计主梁-次梁-板结构配筋。ANSYS 非线性有限元分析结构在正常使用状态、设计荷载及极限状态下的内力分布规律。初步分析表明,由于次梁刚度小于主梁刚度,多数情况下位于次梁处的楼板仍为正弯矩,这与按“边支承板”分析的楼板负弯矩有较大的差异;影响主梁、次梁、板弯矩分配比例的主要因素是综合梁板刚度比 α ,影响次梁与板弯矩分配比例的主要因素是次梁板刚度比 γ ;梁中支座截面处于偏心受压状态、跨中截面处于偏心受拉状态,板中支座截面处于偏心受拉状态、跨中截面处于偏心受压状态,导致梁跨中截面、板支座截面钢筋应力偏大,以及梁支座截面、板跨中截面钢筋应力偏小。

在上述计算分析的基础上,初步提出了考虑主梁-次梁-板结构协同工作的设计方法。

关键词: 主梁-次梁-板协同工作; 综合梁板刚度比; 非线性有限元分析;

ABSTRACT

It is used the concept of “edge-supported slab” to design the reinforced concrete main-beam-sub-beam-slab structure, which can not present the coordinated work of beams and slabs, cause the large differences of analytical internal force distribution (specially internal force of slabs) with actual internal force distribution. Revealing the exit problem of the design theory of “edge-supported slab”, researching the mechanism of coordinated work of reinforced concrete main-beam-sub-beam-slab structure and improving the analysis method of that are paid much attention by engineering.

Finite element analysis program ANSYS is used to modeling the experiment of the reinforced concrete beam-slab structure, compare with the result of finite element analysis and the result of experiment, we consider that if the parameter used correctly, ANSYS can model the performance of the reinforced concrete beam-slab structure exactly.

A three-by-three spans model of reinforced concrete main-beam-sub-beam-slab structure with equi-column-spacing is built with the edge-supported slab design theory. ANSYS is used to analysis the internal force distributing rule under normal service condition and ultimate limit state. The analysis shows that the moment of slab nearby sub-beam mostly is positive, which is much different from the edge-supported slab theory, the integrating stiffness ratio of beam and slab is the main factor of main-beam, sub-beam and slab moment distribution proportion. the stiffness ratio of sub-beam and slab is the main factor of sub-beam and slab moment distribution proportion. The larger steel stress of the middle section of beam and the support section of slab and smaller steel stress of support section of beam and middle section of slab are caused by the state of eccentrical compression of the support section of beam and eccentrical tension of middle section of beam and eccentrical tension of the support section of slab and eccentrical compression of middle section of slab.

Based on the analysis above, it is tentatively proposed a new design method, in which coordinated work mechanism of main beam-sub-beam-slab structure is

considered .

Keywords: Coordinated work of main beam-sub-beam-slab structure; integrating stiffness ratio of beam and slab; Nonlinear finite element analysis

厦门大学博士论文摘要库

目 录

第一章 绪论	1
1.1 钢筋混凝土楼盖体系概述	1
1.1.1 钢筋混凝土楼盖体系	1
1.1.2 梁板楼盖体系	2
1.1.3 主-次梁楼盖体系	4
1.2 钢筋混凝土主梁-次梁-板结构设计方法存在的问题	5
1.3 本文的研究内容	6
1.3.1 试验模拟	6
1.3.2 设计理论分析	6
1.4 本文的研究方法	6
第二章 钢筋混凝土梁板楼盖结构试验的非线性有限元模拟.....	9
2.1 钢筋混凝土有限元简介	9
2.2 试验简介	10
2.3 试验有限元模拟的求解过程	12
2.3.1 建立有限元模型	12
2.3.2 施加边界条件、施加荷载及求解控制	14
2.3.3 查看结果	15
2.4 有限元模拟结果分析	15
2.4.1 各梁和板中点挠度计算所得结果与试验值比较	15
2.4.2 各截面钢筋应力试验值与计算结果比较	19
2.5 本章小结	24
第三章 钢筋混凝土主梁-次梁-板结构非线性有限元分析	25
3.1 计算模型介绍	25
3.2 计算模型有限元模拟	27
3.2.1 建立有限元模型	27
3.2.2 施加边界条件、施加荷载及求解控制	30
3.2.3 查看结果	31
3.3 非线性和线弹性有限元模拟结果分析比较	31
3.4 由非线性和线弹性分析得出的结论	40
3.5 钢筋混凝土主梁-次梁-板结构的弯矩分配规律.....	41
3.5.1 试验模型介绍	41
3.5.2 y 方向梁和板的总弯矩分配规律	43
3.5.3 y 方向梁总弯矩在各截面的分配规律	49
3.5.4 y 方向板总弯矩在各截面的分配规律	53
3.5.5 x 方向梁和板的总弯矩分配规律	58
3.5.6 x 方向梁总弯矩在各截面的分配规律	62
3.5.7 x 方向板总弯矩在各截面的分配规律	63
3.6 本章小结	76

第四章 钢筋混凝土主梁-次梁-板结构设计实例	79
4.1 模型设计	79
4.2 钢筋应力比较	81
4.3 本章小结	86
第五章 结论及展望	87
5.1 结论	87
5.2 展望	90
参考文献	91
致 谢	94

CONTENTS

Chapter 1 Preface	1
1.1 Summarize of reinforced concrete plate system	1
1.1.1 Reinforced concrete plate system	1
1.1.2 Slab and beam system	2
1.1.3 Main-beam and sub-beam system	4
1.2 Existence problem of design method of reinforced concrete main-beam-sub-beam-slab structure	5
1.3 Research content	6
1.3.1 Test modeling	6
1.3.2 Design theory analysis	6
1.4 Research method	6
Chapter 2 Non-linear finite element modeling of reinforced concrete beam-slab structure test	9
2.1 Introduction of reinforced concrete finite element	9
2.2 Introduction of test	10
2.3 Solving Process of test modeling	12
2.3.1 Build the finite element model	12
2.3.2 Boundary condition load and analysis control	14
2.3.3 The result export	15
2.4 Finite element modeling result analysis	15
2.4.1 Compare of displacement of test and finite element analysis	16
2.4.2 Compare of the steel stress at each section	19
2.5 Summarize	24
Chapter 3 Non-linear finite element analysis of reinforced concrete main-beam-sub-beam-slab structure	25
3.1 Analysis model introduction	25
3.2 Test modeling	27
3.2.1 Build the finite element model	27
3.2.2 Boundary condition load and analysis control	30
3.2.3 The result export	31
3.3 Compare the results of non-linear and elastic modeling	31
3.4 Conclusion of the non-linear and elastic analysis	40
3.5 The moment distribute rule of reinforced concrete of main-beam-sub-beam-slab structure	41
3.5.1 Introduction of test modeling	41
3.5.2 The total moment distribute rule of beam and slab at y direction	43

3.5.3 The moment distribute rule of beam at x direction	49
3.5.4 The moment distribute rule of slab at x direction.....	53
3.5.5 The total moment distribute rule of beam and slab at x direction .	58
3.5.6 The moment distribute rule of beam at y direction	62
3.5.7 The moment distribute rule of slab at y direction.....	63
3.6 Summarize	76
Chapter 4 Example of reinforced concrete main-beam-sub-beam-slab	
structure	79
4.1 design model	79
4.2 Compate of the steel stress	81
4.3 Summarize	86
Chapter 5 Conclusions and expectations	87
5.1 Conclusion	87
5.2 Expectations.....	90
Reference.....	91
Acknowledgements	94

第一章 绪论

1.1 钢筋混凝土楼盖体系概述

1.1.1 钢筋混凝土楼盖体系

楼盖是建筑结构重要的组成部分,钢筋混凝土楼盖的造价占到整个土建总造价的近 30%,其自重约占到总重量的一半,选择合适的楼盖设计方案,并采用正确的方法,合理地进行设计计算,对于整个建筑结构都具有十分重要地作用作为建筑中的水平结构体系,是竖向荷载的直接承担者,通过楼盖体系,竖向荷载得以传递到竖向构件,如柱和墙,并最终传递至基础;同时,水平荷载(如风载、地震作用等)的传递,则是通过楼盖的作用在各抗侧力构件中分配。楼盖体系是构成建筑空间和结构体系的重要组成部分,在整个建筑中占了举足轻重的地位,在整个建筑形式和结构形式的发展中也占据着不可替代的地位^[6]。

在各种楼盖结构中,钢筋混凝土楼盖的应用最为广泛。按支承条件,钢筋混凝土楼盖可以分为无梁楼盖与肋梁楼盖两大类型^{[1][7][8]}。

一、无梁楼盖

无梁楼盖是指在柱网之间未设置框架梁的平板结构,该楼盖结构一般包括平板无梁楼盖和带柱帽的无梁楼盖两种形式。

(a) 平板无梁楼盖^[8]

平板无梁楼盖板底平整,具有良好的视觉效果,无需吊顶。在竖向荷载作用下,平板无梁楼盖由于没有框架梁的支承作用,其变形远大于相同条件下肋梁楼盖,相应的楼盖内力也较大,因此平板无梁楼盖常常较厚。平板在柱顶处受柱的冲切作用较大,常需在此设置受剪钢筋予以加强。与肋梁楼盖相比,平板无梁楼盖的节点较弱,长期荷载作用下的挠度较大,它适用于跨度不大且荷载较轻的情况,在地震区不宜直接使用。

(b) 带柱帽无梁楼盖

由于平板无梁楼盖在柱顶处的冲切强度不易满足,常需设置柱帽,这也就形成带柱帽无梁楼盖。这种楼盖主要由柱、柱帽、托板、平板等构件组成。这种楼盖的内景相对于平板无梁楼盖略差一些。

二、肋梁楼盖

肋梁楼盖是指每块板格的边上都有梁作为支承,它可分为主梁楼盖、主次梁楼盖、宽扁梁楼盖、井字梁楼盖等不同类型。

(a) 主梁楼盖

主梁楼盖是钢筋混凝土楼盖最基本形式之一。它仅在柱网位置处设置框架梁,由于框架梁的存在,结构抗侧刚度较普通无梁楼盖显著提高。但当柱网跨度较大时,楼盖太厚而造成材料的浪费。

(b) 主次梁楼盖

主次梁楼盖是工程设计中最常用的楼盖形式。由于设置一定数量的次梁,楼盖的跨度大大减小从而使板厚较薄,同时其对结构整体刚度的贡献比其它肋梁楼盖要大。无论从受力方面或经济效益来看,主次梁楼盖均是较为理想的结构形式之一。

(c) 宽扁梁楼盖^[8]

宽扁梁楼盖是适应建筑物功能需要而出现的一种新型楼盖体系。它与前面两种楼盖的区别就在于它的梁的宽度大于支座(柱或墙)宽度。与主梁楼盖和主次梁楼盖相比,由于宽扁梁的梁高一般较小,采用此种楼盖的房屋的建筑高度可以大大降低。因此,近年来,宽扁梁楼盖在结构中得到广泛应用。

(d) 井字梁楼盖

主次梁既可看作次梁间距较密的主次梁楼盖(主梁刚度与次梁刚度基本相当),亦可看作无梁楼盖的一种变体(局部受拉区混凝土挖除)。井字梁楼盖用于大跨、重荷载的结构时可有效提高结构竖向抗弯刚度,减小楼盖的变形^[1]。

1.1.2 梁板楼盖体系

就结构形式及其传力途径而论,国际结构界将建筑物的水平结构分体系(楼盖和平屋盖)基本上分成为平板或无梁楼板体系、梁板体系、主次梁体系、双向密肋或井字梁体系。梁板楼盖体系是所有水平分体系中开发、应用最早的,同时也是设计人员用得最为普遍的一种楼盖结构型式,而且还有相关的设计手册等辅助设计工具,所以本节将重点针对我国目前的设计现状,讨论一些在设计梁板楼盖体系时应注意的一些基本概念^[10]。

(1) 单向板—梁楼盖

在梁板楼盖体系中,根据柱网两个正交方向的框架梁所分别承担的板面荷载大小比例,可分类为单向板—梁楼盖和双向板—梁楼盖两种结构形式。

在均布荷载作用下,构件的变形是与其自身承担的荷载(q_i)和跨度的四次方(L_i)成正比的,而与弹性模量和横截面惯性矩成反比,即 $\Delta \sim q_i L_i^4 / E_i I_i$ 。设一矩形柱网的两个正交方向跨度分别为 L_1 (短跨)和 L_2 (长跨),楼板的截面高度与弹性模量在两个方向都是一样的,刚 $E_1 I_1 = E_2 I_2$ 。而且板上任何一点的竖向变形挠度对两个正交方向的板带来讲也都是共同的,所以 $\Delta_1 = \Delta_2$,则 $q_1 L_1^4 = q_2 L_2^4$ 或 $q_1 = q_2 (L_2/L_1)^4$ 。而 $q_1 + q_2 = q$ 。所以,在均布荷载作用下,楼面荷载沿两个正交方向传递的大小比例,基本上是取决于下次梁跨度长宽比的四次方,见表 1.1。

表 1.1 不同跨度长宽比的板双向受力状况

长跨 L_2 /短跨 L_1	1.0	1.25	1.50	1.75	2.0	2.5	3.0
$(L_2/L_1)^4$	1.0	2.44	5.06	9.38	16.0	39.0	81
q_1 (沿短向)	50%	71%	83%	90%	94%	97%	99%
q_2 (沿长向)	50%	29%	17%	10%	6.0%	3.0%	1.0%

当 $L_2/L_1 \geq 1.5$ 时,大于 80%的楼板荷载沿短向传给长梁,而沿长向传给短梁的楼面荷载已不足 20%,所以,当跨度长宽比大于等于 1.5 的梁板结构可按单向板—梁设计^[1]。

在单向板—梁结构设计中,由于绝大部分的板面荷载是沿短向传给了长梁,而只有极小一部分是沿长向传给短梁,所以短梁或者是主要用来作为柱子之间的框架梁,或者在抗侧力的竖向构件已满足设计要求的情况下就干脆将短梁取消,而采用纯粹的单向设计。

框架梁应按它所承担的楼板面积荷载和自身所需传递的水平力及其约束能力来进行设计。对连续多跨的等柱间距框架梁来讲,在竖向均布荷载作用下的梁最大正、负弯矩都应出现在边跨。最大负弯矩位于第一内柱的梁端,而边柱内侧梁端的负弯矩最小。

框架梁的截面形式可根据不同的设计条件选择常规的矩形截面或宽扁梁,虽然宽扁梁对框架结构的整体刚度贡献较常规梁差,且节点设计比较复杂,但它的

优势是在合理设计的前提下所占的结构空间高度小和有较好的延性功能与变形能力。

(2) 双向板—梁楼盖

在整体设计一个近乎方形的板—梁结构体系时,应考虑该体系在两个方向的抗弯。首先,每根梁均沿一个方向承受其所担负板面上的荷载。而与其正交的其他梁将沿另一方向承受其所担负板面上的荷载。因此,若梁的刚度很大,为 T 形梁作用,则在初步设计时可假设每个方向的梁大约承担该方向总弯矩的 $2/3$ 。而该方向的跨中 $2/3$ 板带约承担总弯矩的 $1/3$ 。对板的设计来讲,跨中板带是决定性的。

但必须强调指出的是,在具体工程项目的双向板—梁楼盖的设计中,由于楼层之间的结构高度限制,框架梁的截面高度受到制约,梁的刚度不可能做得很大。所以,在梁和板的刚度比 α 不是很大的情况下,则该板将在两个方向承受更多的总弯矩。随着梁板刚度比的减小,板承受弯矩的面积将向整个开间扩展,开间边缘板带所承受的弯矩会迅速加大。也就是说,根据梁的结构平面布置和梁的自身刚度,每一个方向的荷载和弯矩都将由梁和板来共同承担,实际上的结构受力性能是介于计算手册中刚性支承的双向板和无梁楼板的结构受力性能之间。梁的刚度越小,则越向无梁楼板的受力状态靠近;梁的刚度越大,则越向手册计算的结果靠近^{[5]~[10]}。

1.1.3 主-次梁楼盖体系

从某种意义上来讲,主梁-次梁-板结构实质上就是对单向板—梁楼盖结构的一种改进,用较大跨度的主梁来取代短向密集布置的柱子,从而提供了更为宽敞的无柱空间。所以,主-次梁楼盖虽然相比平板和双向密肋体系存在着结构高度较大,相比平板和双向板—梁体系模板制作比较复杂的问题,但却具有下列绝对优势:

(1)精心设计的主-次梁楼盖混凝土平均折算厚度很小,可与双向密肋一样,重量较轻

(2)开间大,如果对于预应力混凝土主-次梁楼盖来讲,它的经济适用跨度可以做到 $(9\sim12)\text{ m} \times (13.5\sim18)\text{ m}$ 。若在一个方向上具有抗弯和抗扭刚度都

很大的边支承时，其正交方向的跨度可以做到 21~36 m，或更大。

(3) 承载能力大，活荷载可达 $10\sim 20\text{kN/m}^2$ ，甚至更大。

(4) 对框架结构的整体刚度贡献比平板和双向密肋要大得多。

(5) 相比平板，双向板—梁和双向密肋楼盖体系，结构受力清楚，传力途径简单明确。

从广义讲，主梁-次梁-板结构的传力途径是：楼面荷载直接作用在比较薄的单向板上，首先传给次梁，再由次梁通过受弯传给主梁，最后由主梁从一个方向传给柱子。在支承和传递荷载过程中，主、次梁的弯曲变形 Δ_i 均与它们各自的弯矩 M_i 及其自身跨度的平方 L_i^2 成正比，而与弹性模量 E 和弯曲平面内的截面惯性矩 I_i 成反比^{[10] [21]}。

1.2 钢筋混凝土主梁-次梁-板结构设计方法存在的问题

目前结构设计中，主梁-次梁-板结构中的主梁、次梁一般均视为楼板无竖向变形的不动支座，从而将整块楼板（以主梁为支撑）分割成多个以主梁、次梁为支撑相互连接四边固支的小板格，该楼板的设计相应分解为这些小板格单独进行。这种设计方法不考虑主梁与次梁对楼板支撑作用的不同，将主梁支座与次梁支座均视为楼板的固端支座，在主梁、次梁位置处配置相同数量用以承担负弯矩的负筋，而在小板格的跨中配置用以承担该板格跨度范围内正弯矩的正筋；负筋在楼板内的锚固长度为小板格净跨度的 1/4。

从竖向荷载作用下主次梁楼板体系的变形来看，主梁由于刚度较大，其竖向位移远远小于次梁、楼板的竖向位移，因而视为次梁与楼板竖向无位移的不动支座是合理的；但次梁刚度较小，其竖向位移相对于楼板的变形已不能忽略，若仍将其视为楼板的不动支座则与实际情况明显不符。竖向荷载作用下以主梁为支撑的整块楼板，其变形虽然与次梁支撑作用密切相关，但仍具有一定的整体性；若将整块楼板简单分解为多块小板格单独工作，则楼板的受力和变形与实际情况存在较大的误差，甚至会影响楼板的安全性。实际上，主次梁楼板体系中，主梁、次梁与楼板之间是相互作用的整体，彼此之间密切联系，共同受力与变形^[39]。

1.3 本文的研究内容

1.3.1 试验模拟

本文运用有限元软件 ANSYS 对美国伊利诺伊大学土木工程系结构研究所在 1969 年做的钢筋混凝土楼盖结构试验作为模拟原型, 对其进行非线性模拟, 在建模过程中选取什么样的建模方式, 选取何种材料的本构关系成为模拟成功与否的关键, 通过比较计算结果和试验结果检验 ANSYS 在钢筋混凝土非线性模拟方面的可行性, 总结出一些 ANSYS 模拟钢筋混凝土结构的经验, 为后续研究提供可靠的研究工具。

1.3.2 设计理论分析

本文通过有限元程序模拟钢筋混凝土主梁-次梁-板结构, 并研究各种不同主梁, 次梁刚度下主梁-次梁-板结构的受力性能, 找出符合钢筋混凝土主梁-次梁-板结构受力性能的规律, 得出有利于主梁-次梁-板结构设计的结论。

1.4 本文的研究方法

结构实验在“混凝土结构理论”的诞生和发展过程中起着非常重要和不可替代的作用。目前, 世界各国的混凝土结构设计规范都是以大量的实验数据为基础而建立起来的。体形特殊、结构复杂的混凝土结构物往往还要通过整体结构的模型实验来验证设计理论、改进设计方法。随着计算机技术的日益普及, 计算机工具在提高社会生产力方面发挥了越来越重要的作用, 在世界范围内有限元已经成为土木建筑行业分析软件的主流。有限元法在钢筋混凝土结构的分析中已经得到了广泛的应用。它能够给出结构或构件的内力和变形发展的全过程、描述裂缝的形成和发展以及结构或构件的破坏过程及形态; 能够对构件的极限承载能力做出评估。所以有限元法在钢筋混凝土设计和计算中有着不可比拟的优点^{[25][26]}。

通过有限元计算分析来模拟试验过程, 作为辅助的研究手段, 能弥补实体试验的不足(受时间、空间和经济条件限制, 以及试验研究的结果受到较多偶然因素的影响; 试验研究在数量、规模和适用范围等诸多方面受到较大的制约; 配筋

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库